The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Berapa lama Bumi dapat tetap hijau? Sebuah model iklim memberi rentang, bukan tanggal kiamat

Dua puluh sembilan simulasi iklim tiga dimensi menempatkan batas yang berbeda bagi biosfer fotosintetik Bumi antara kira-kira 1,35 dan 1,87 miliar tahun dari sekarang. Nilai tersebut bergantung pada jalur yang sengaja disederhanakan untuk pelapukan batuan, panas, dan kadar karbon dioksida terendah yang mungkin dapat digunakan tumbuhan. Nilai itu tidak memprediksi kapan semua tumbuhan, semua kehidupan, peradaban, atau planet akan berakhir.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

Berapa lama Bumi dapat tetap hijau? Sebuah model iklim memberi rentang, bukan tanggal kiamat

Sebuah daun hidup di dalam kompromi yang sempit. Ia membutuhkan cahaya, air, karbon dioksida, dan suhu yang masih dapat ditoleransi oleh kimianya. Dalam rentang hidup manusia, Matahari tampak seperti bagian yang tetap dari kompromi itu. Dalam satu miliar tahun, tidak demikian.

Ketika Matahari menua di deret utama, perlahan-lahan ia menjadi lebih terang. Lebih banyak sinar Matahari menghangatkan Bumi, tetapi planet memiliki respons jangka panjang: reaksi antara air hujan, karbon dioksida, dan batuan silikat dapat menghilangkan karbon dioksida dari atmosfer. Hal ini melemahkan efek rumah kaca dan mengimbangi sebagian pemanasan. Namun respons yang sama yang mendinginkan planet pada akhirnya juga dapat mengurangi karbon yang digunakan organisme fotosintetik untuk membangun jaringan hidup.

Sebuah makalah baru di Journal of Geophysical Research: Atmospheres menanyakan batas mana yang mungkin tiba lebih dahulu: terlalu panas, atau terlalu sedikit karbon dioksida. Jawabannya bukan tanggal ketika Bumi mati. Di sepanjang dua jalur masa depan yang sengaja disederhanakan, batas yang diadopsi untuk kehidupan fotosintetik berada antara kira-kira **1,35 dan 1,87 miliar tahun dari sekarang**.

Rentang itu membahas **biosfer vegetatif**: bagian dari sistem kehidupan Bumi yang ditopang organisme fotosintetik, terutama tumbuhan dan kehidupan lain yang mengubah cahaya serta karbon dioksida menjadi materi biologis. Ini bukan ramalan untuk setiap mikroba. Bukan umur peradaban manusia. Bukan umur planet.

Termostat planet memiliki dua pengaturan yang tidak pasti

Ketidakpastian pusat adalah **pelapukan silikat**. Karbon dioksida larut dalam air hujan, bereaksi dengan batuan silikat, lalu akhirnya dibawa ke lautan dan sedimen. Gunung berapi mengembalikan karbon dioksida pada skala waktu geologis. Bersama-sama, proses ini membentuk bagian dari siklus karbonat-silikat, yang sering digambarkan sebagai termostat planet.

Dalam dunia yang lebih hangat dan basah, pelapukan mungkin semakin cepat dan menghilangkan karbon dioksida dengan lebih cepat. Namun ilmuwan tidak tahu seberapa kuat respons ini akan mengendalikan Bumi di bawah Matahari masa depan yang lebih terang. Karena itu Jacob Haqq-Misra dan Eric Wolf tidak memilih satu jalur yang dianggap benar. Mereka memodelkan dua **end member**: kasus ekstrem yang sengaja dipilih untuk membatasi ketidakpastian.

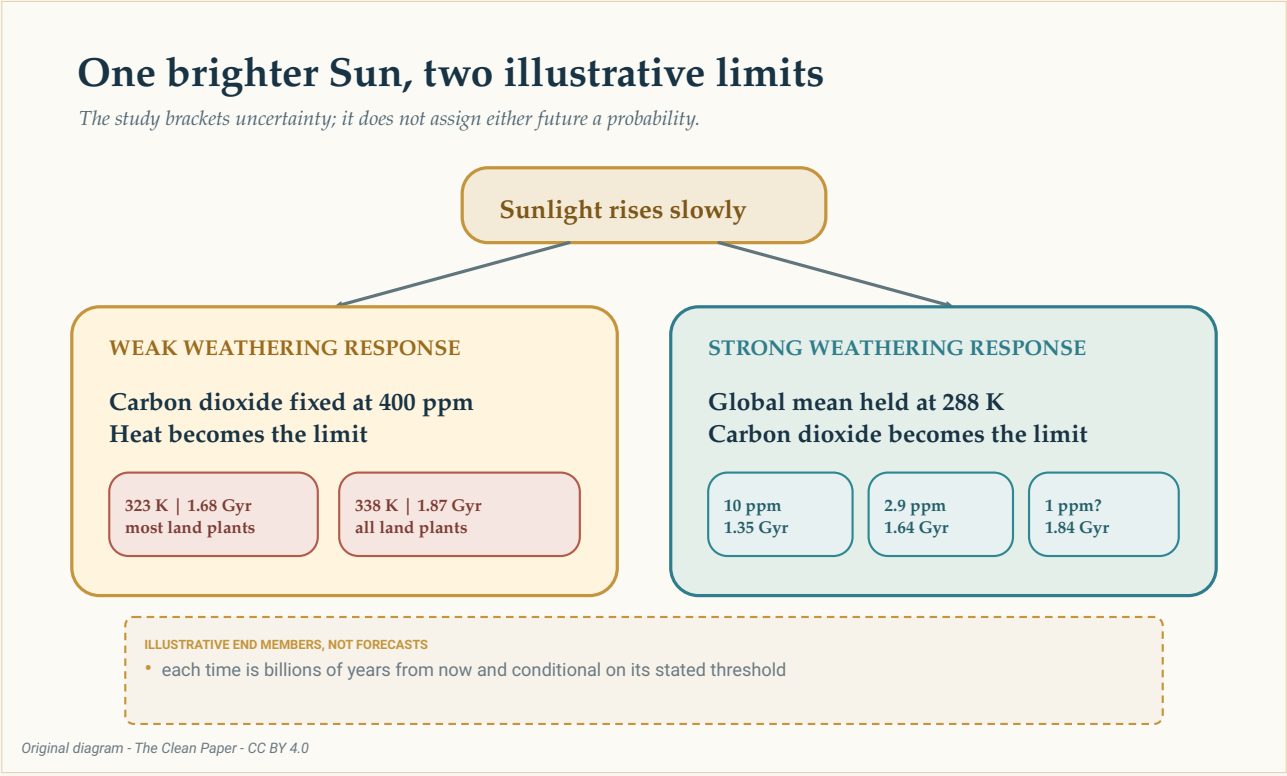
- Dalam **end member pelapukan lemah**, karbon dioksida atmosfer tetap pada 400 bagian per sejuta sementara Matahari yang makin terang menaikkan suhu.
- Dalam **end member pelapukan kuat**, suhu rata-rata global permukaan tetap 288 kelvin, sekitar 15 derajat Celsius, sementara karbon dioksida ditarik turun ketika sinar Matahari meningkat.

Tidak satu pun cabang disajikan sebagai masa depan Bumi yang sebenarnya. Yang pertama menanyakan apa yang dilakukan panas jika karbon dioksida tetap tinggi. Yang kedua menanyakan apa yang dilakukan kelaparan karbon jika pelapukan mempertahankan suhu rata-rata global dekat nilai saat ini.

Bagaimana pelapukan dapat bertindak seperti termostat?

Analogi ini membahas umpan balik, bukan kenop kontrol literal. Ketika iklim yang lebih hangat mempercepat pelapukan kimia, lebih banyak karbon dioksida atmosfer dapat berakhir sebagai zat terlarut, mineral, dan sedimen. Penghilangan gas rumah kaca ini melawan sebagian pemanasan awal. Pada skala waktu sangat panjang, pelepasan gas vulkanik mengembalikan karbon dioksida.

Kekuatan tiap mata rantai bergantung pada curah hujan, batuan yang tersingkap, erosi, biologi, tektonik, dan kimia laut. Itulah sebabnya makalah menguji respons pembatas alih-alih memperlakukan termostat sebagai mesin yang sudah diketahui.



Makalah membatasi masa depan yang tidak pasti dengan dua end member ilustratif. Jika pelapukan merespons lemah, kenaikan panas mencapai ambang yang diadopsi untuk tumbuhan darat. Jika merespons kuat, penurunan karbon dioksida mencapai ambang fotosintesis yang diadopsi. Ini adalah cabang model bersyarat, bukan probabilitas atau tanggal hitung mundur.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dua puluh sembilan dunia model yang sudah setimbang, bukan satu film dua miliar tahun

Para peneliti menggunakan ExoCAM, sebuah model iklim global tiga dimensi, untuk menghitung **29 iklim keadaan tunak** di berbagai kombinasi sinar Matahari yang lebih kuat dan karbon dioksida yang lebih rendah. Setiap kasus dijalankan selama 70 tahun model. Di sini, satu tahun model adalah satu siklus tahunan simulasi pada kondisi tetap: ini adalah waktu komputasi yang digunakan agar iklim buatan mencapai keadaan stabil, bukan satu langkah dalam ramalan tahun demi tahun masa depan Bumi. Dua puluh tahun terakhir dirata-ratakan setelah iklim simulasi diberi waktu untuk stabil.

Ke-29 kasus itu adalah dunia model yang terpisah. Setiap run adalah satu titik pada grid, menjawab "iklim setimbang apa yang cocok untuk pasangan sinar Matahari dan karbon dioksida ini?" Komputer tidak memulai dari Bumi hari ini lalu terus mengembangkan atmosfer, batuan, lautan, dan kehidupan selama dua miliar tahun berikutnya. Sebaliknya, para penulis menelusuri dua jalur pelapukan skematis melalui titik-titik yang sudah dihitung sebelumnya; jalur di antara titik tidak disimulasikan sendiri.

Tabel mereproduksi kombinasi sinar Matahari dan karbon dioksida dalam arsip data model resmi. ID kasus adalah bantuan baca yang ditambahkan di sini mengikuti urutan arsip. **S/S0** adalah konstanta Matahari relatif: energi Matahari masuk yang digunakan dalam model dibagi nilai saat ini, S0. Nilai 1,2 karena itu berarti energi Matahari masuk 20 persen lebih besar daripada hari ini. **CO2 (ppm)** adalah rasio pencampuran karbon dioksida atmosfer dalam molekul per satu juta molekul atmosfer.

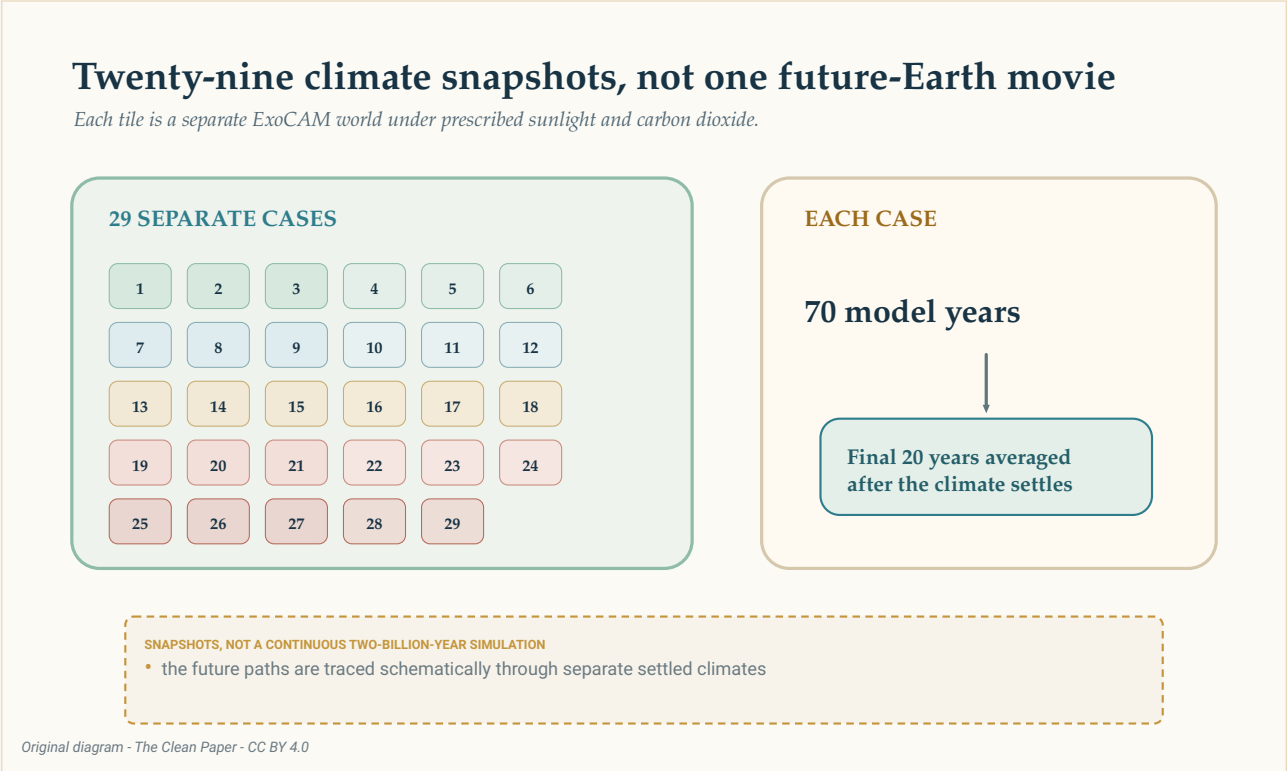
ID kasus	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

ID kasus	S/S0	CO2 (ppm)
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

Bumi dalam model masih dapat dikenali tetapi sengaja dibatasi. Ukurannya sama dengan Bumi dan menggunakan geografi masa kini. Model memakai lautan slab sederhana alih-alih lautan dengan sirkulasi penuh, tekanan atmosfer kira-kira sama dengan nilai Bumi saat ini (satu bar), dan metana tetap. Orbitnya benar-benar sirkular (eksentrisitas nol), dan sumbu rotasinya tidak miring (obliquity nol). Model tidak memiliki tanah, vegetasi, atau umpan balik eksplisit dari biosfer yang berubah. Yang paling penting, model iklim tidak dikopel secara dinamis ke model pelapukan batuan. Dengan kata lain, ExoCAM tidak menghitung pelapukan, menggunakannya untuk memperbarui karbon dioksida, lalu menjalankan iklim berikutnya dalam sebuah loop umpan balik. Para peneliti justru menetapkan dua jalur pembatas dan menelusurinya melalui grid 29 kasus iklim.

Apa arti “keadaan tunak” dalam model iklim?

Kasus keadaan tunak adalah iklim model yang dibiarkan stabil di bawah satu pilihan Matahari dan atmosfer. Cuaca tetap berubah dari hari ke hari dan tahun ke tahun di dalam simulasi, tetapi rata-rata jangka panjangnya berhenti bergeser secara kuat.
Ini berguna untuk bertanya “iklim apa yang cocok dengan kondisi ini?” Hal itu berbeda dari memprediksi jalur tepat bagaimana Bumi nyata bergerak dari satu kondisi ke kondisi berikutnya.



Setiap ubin adalah run iklim ExoCAM terpisah selama 70 tahun model, dengan 20 tahun terakhir dirata-ratakan. Studi mengambil sampel 29 iklim setimbang pada kondisi sinar Matahari dan karbon dioksida yang ditetapkan; ia tidak mensimulasikan satu Bumi yang terus berevolusi selama dua miliar tahun.

The Clean Paper CC BY 4.0

End member pertama: cukup karbon dioksida, terlalu banyak panas

Dalam cabang pelapukan lemah, karbon dioksida tetap 400 bagian per sejuta. Ketika masukan Matahari naik, panas menjadi faktor pembatas.

Makalah menggunakan dua ambang suhu rata-rata global dari penelitian sebelumnya:

- Pada **323 kelvin**, sekitar **50 derajat Celsius** sebagai rata-rata tahunan global, dunia dianggap terlalu panas untuk sebagian besar tumbuhan darat. Model mencapai ambang itu dalam sekitar **1,68 miliar tahun**.
- Pada **338 kelvin**, sekitar **65 derajat Celsius** sebagai rata-rata tahunan global, dunia dianggap terlalu panas untuk semua tumbuhan darat. Model mencapai ambang itu dalam sekitar **1,87 miliar tahun**.

Ini adalah batas biologis yang diadopsi, bukan suhu universal di mana setiap organisme fotosintetik pasti gagal. Rata-rata global juga menyembunyikan perbedaan regional yang besar. Studi secara terpisah memeriksa di mana kombinasi suhu dan air mungkin tetap cocok, tetapi label pada peta iklim

tidak dapat menginventarisasi setiap tempat perlindungan atau adaptasi masa depan.

End member kedua: suhu masih tertoleransi, karbon dioksida terlalu sedikit

Dalam cabang pelapukan kuat, suhu rata-rata global dipertahankan pada 288 kelvin, sekitar 15 derajat Celsius, sementara karbon dioksida atmosfer turun. Di sini jawabannya bergantung pada seberapa sedikit karbon yang mungkin digunakan jalur fotosintesis berbeda.

- Pada ambang tradisional **10 bagian per sejuta** — 10 molekul karbon dioksida untuk setiap sejuta molekul atmosfer — batas fotosintesis C4 tiba dalam sekitar **1,35 miliar tahun**. Fotosintesis C4 digunakan oleh tumbuhan termasuk jagung dan tebu, dan memusatkan karbon dioksida di sekitar enzim yang memfiksasi karbon.
- Dengan ambang C4 alternatif **2,9 bagian per sejuta** yang dibahas dalam penelitian sebelumnya, batas itu bergeser ke sekitar **1,64 miliar tahun**.
- Ambang tentatif **1 bagian per sejuta**, dikaitkan dengan kemungkinan bertahannya sebagian tumbuhan CAM — tumbuhan yang menggunakan metabolisme asam crassulacean, memisahkan pengambilan karbon dioksida pada malam hari dari penggunaannya pada siang hari — atau tumbuhan akuatik yang mampu menggunakan bikarbonat terlarut, menggeser batas ke sekitar **1,84 miliar tahun**.

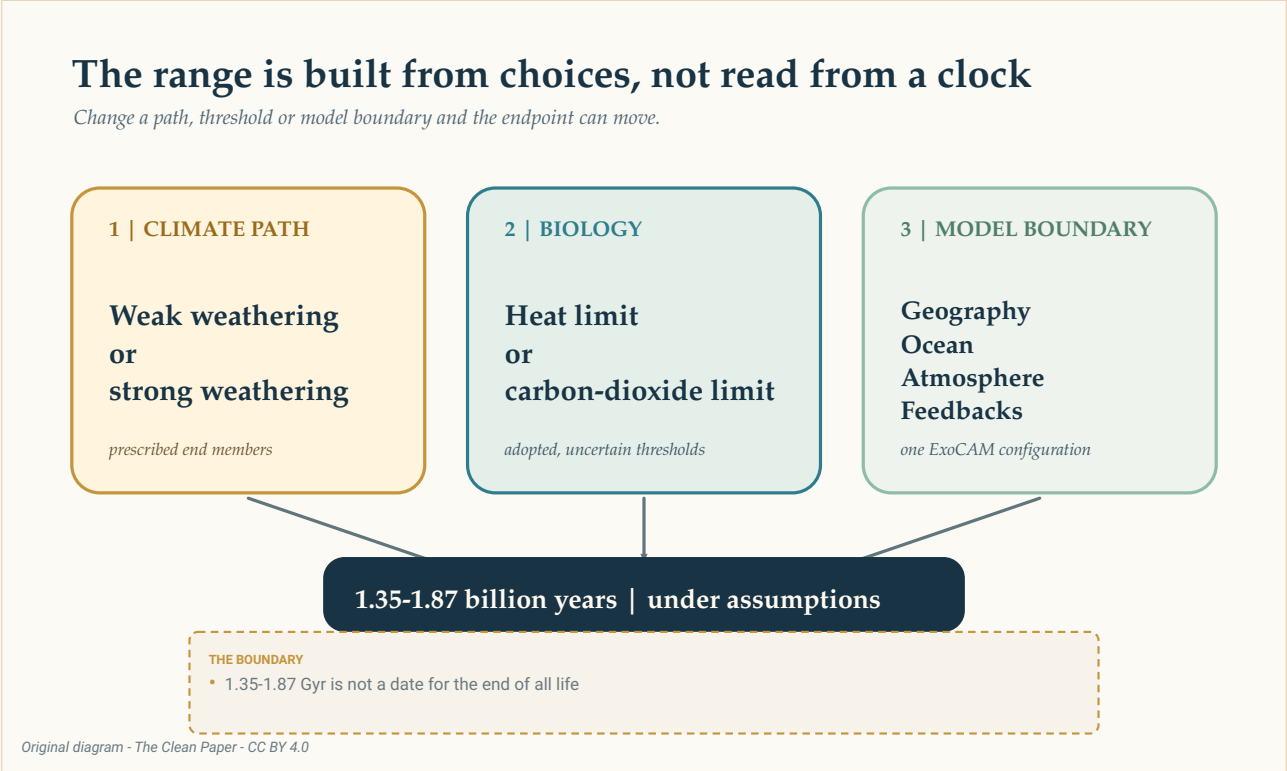
Angka terakhir membawa catatan biologis terbesar. Para penulis secara eksplisit menyebut batas satu-bagian-per-sejuta sebagai tentatif. Itu bukan ambang kelangsungan hidup yang telah dibuktikan secara eksperimen untuk semua tumbuhan CAM atau vegetasi akuatik dalam kondisi Bumi masa depan.

> **C3, C4, dan CAM adalah strategi, bukan tangga**
>
> Tumbuhan menggunakan jalur biokimia berbeda untuk menangkap karbon. **Fotosintesis C3** adalah yang paling umum. **Fotosintesis C4**, yang digunakan tumbuhan seperti jagung dan tebu, memusatkan karbon dioksida di sekitar enzim yang memfiksasi karbon dan dapat bekerja lebih baik ketika karbon dioksida langka. **Metabolisme asam crassulacean (CAM)** memisahkan pengambilan dan penggunaan karbon antara malam dan siang, membantu banyak tumbuhan menghemat air.
> Ini adalah keluarga strategi dengan banyak perbedaan antarspesies, bukan tingkatan berurutan tumbuhan yang "lebih baik." Ambang karbon dioksida yang sangat rendah dalam makalah adalah asumsi untuk mengeksplorasi kemungkinan batas, bukan jaminan bahwa ekosistem masa depan akan berevolusi untuk menggunakannya.

Mengapa 1,86 miliar tahun bukan tanggal kedaluwarsa

Estimasi utama makalah sekitar **1,86 miliar tahun** adalah rata-rata dari dua batas akhir atas yang optimistis: 1,84 miliar tahun pada cabang yang dibatasi karbon dioksida dan 1,87 miliar tahun pada cabang yang dibatasi panas. Ini adalah ringkasan ringkas dari dua skenario berbeda. Bukan hasil model ketiga dengan presisi lebih tinggi, dan bukan tanggal estimasi terbaik.

Bahkan rentang lebih luas 1,35 hingga 1,87 miliar tahun tidak membawa satu probabilitas. Nilai bawah dan atasnya bergantung pada asumsi pelapukan berbeda, ambang biologis berbeda, dan satu konfigurasi model iklim. Rentang itu mengukur pilihan dalam eksperimen hampir sama besarnya dengan mengukur waktu.



Rentang 1,35 hingga 1,87 miliar tahun hanya muncul setelah memilih jalur pelapukan, ambang biologis, dan batas model. Ini adalah peta asumsi, bukan jam yang berakhir dengan kepunahan seluruh kehidupan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Batas lain mungkin datang lebih dulu

Estimasi terpanjang untuk biosfer vegetatif mendekati batas lain yang terpisah dan tidak pasti: rumah kaca lembap atau runaway greenhouse yang dapat mendorong hilangnya sebagian besar lautan. Model iklim sangat berbeda pendapat tentang kapan keadaan itu dimulai ketika sinar Matahari meningkat, terutama jauh dari kondisi masa kini. Beberapa estimasi menempatkannya sebelum batas fotosintesis paling optimistis.

Artinya, cabang atas tidak dapat dibaca sebagai janji bahwa Bumi akan mempertahankan lautan, benua yang familiar, atau kondisi permukaan layak huni hingga 1,87 miliar tahun dari sekarang. Model juga tidak mencakup tektonik lempeng masa depan, perubahan luas daratan, ekosistem yang berevolusi, atau lautan yang sepenuhnya dinamis. Perhitungannya mengenai bagaimana atmosfer menyerap dan memancarkan energi juga didorong ke rezim sinar Matahari intens dan karbon dioksida amat rendah, tempat berbagai model mulai menyimpang.

Adaptasi evolusioner dan intervensi teknologi muncul dalam pembahasan makalah sebagai kemungkinan. Keduanya bukan keluaran dari 29 simulasi iklim. Model tidak menunjukkan organisme masa depan berevolusi dengan jalur fotosintesis satu-bagian-per-sejuta, dan tidak menunjukkan peradaban mengelola atmosfer selama satu miliar tahun.

Ini bukan hasil tentang krisis iklim saat ini

Peningkatan kecerahan Matahari bekerja selama ratusan juta hingga miliaran tahun. Pemanasan modern akibat manusia berasal dari kenaikan cepat gas rumah kaca selama dekade dan abad. Keduanya adalah forcing berbeda, pada skala waktu yang sangat berbeda, dan menjawab pertanyaan berbeda.

Tidak ada dalam studi ini yang melemahkan bukti perubahan iklim saat ini atau menjadi argumen untuk menunda tindakan. Biosfer yang mungkin mempertahankan sebagian kehidupan fotosintetik di bawah satu skenario model masa depan yang sangat jauh tidak sama dengan iklim tempat masyarakat dan ekosistem hari ini tetap aman.

Makalah ini berharga karena membuat pertanyaan yang sangat jauh menjadi lebih disiplin. Ia menunjukkan bahwa model terdahulu yang lebih sederhana mungkin terlalu banyak memanaskan ketika sinar Matahari meningkat sementara karbon dioksida tetap, dan bahwa kehidupan fotosintetik mungkin memiliki lebih banyak jalur untuk bertahan daripada satu ambang karbon kanonik. Ia juga menunjukkan mengapa setiap tambahan pecahan satu miliar tahun datang bersama rantai asumsi.

Matahari yang memberi makan sebuah daun perlahan berubah. Apakah Bumi tetap hijau selama 1,35, 1,87, atau angka lain dalam miliaran tahun akan bergantung pada batuan, air, atmosfer, dan kehidupan yang merespons bersama. Hasil yang jujur bukan sebuah tanggal. Ia adalah pandangan yang lebih luas atas kompromi itu.

Singkatnya

Sebuah studi iklim tiga dimensi menanyakan berapa lama biosfer vegetatif — fotosintetik — Bumi dapat bertahan ketika Matahari perlahan menjadi lebih terang. Para peneliti menghitung 29 iklim keadaan tunak terpisah dan menelusuri dua end member ilustratif melalui hasil tersebut. Dengan pelapukan lemah dan karbon dioksida tetap 400 bagian per sejuta, batas panas yang diadopsi untuk

tumbuhan darat terjadi sekitar 1,68 dan 1,87 miliar tahun dari sekarang. Dengan pelapukan kuat dan suhu rata-rata global tetap 288 kelvin, sekitar 15 derajat Celsius, batas karbon dioksida yang diadopsi untuk fotosintesis terjadi sekitar 1,35, 1,64 dan, dengan ambang tentatif, 1,84 miliar tahun. Angka 1,86 miliar tahun yang sering dikutip hanyalah rata-rata yang dibulatkan dari dua batas akhir atas yang optimistis. Ini adalah rentang model yang bergantung pada skenario, bukan tanggal ketika Bumi, manusia, atau seluruh kehidupan akan berakhir. Model memakai jalur yang ditetapkan, geografi masa kini, lautan slab, dan tanpa kopling eksplisit tanah–vegetasi atau iklim–pelapukan, sementara estimasi terpanjang mendekati batas rumah kaca dan kehilangan lautan yang tidak pasti.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Dalam konfigurasi ExoCAM ini, iklim tiga dimensi umumnya memanas lebih sedikit di bawah kenaikan sinar Matahari dan karbon dioksida tetap dibandingkan model sederhana yang digunakan sebagai pembanding. Di antara dua end member pelapukan yang ditetapkan dan beberapa ambang biologis yang diadopsi, batas biosfer vegetatif berada antara kira-kira 1,35 dan 1,87 miliar tahun dari sekarang.

Apa yang masuk akal tetapi belum ditetapkan: Bahwa sebagian tumbuhan CAM atau tumbuhan air yang menggunakan bikarbonat terlarut dapat mempertahankan fotosintesis dekat satu bagian per sejuta karbon dioksida atmosfer; bahwa adaptasi atau teknologi dapat memperpanjang kehidupan fotosintetik lebih jauh; dan bahwa jalur iklim-pelapukan nyata akan tetap berada di antara dua end member model.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Tanggal tetap untuk akhir seluruh tumbuhan, seluruh kehidupan, peradaban manusia, lautan Bumi, atau planet; satu simulasi kontinu untuk dua miliar tahun ke depan; atau alasan apa pun untuk meremehkan perubahan iklim akibat manusia saat ini.

Keterbatasan utama: Dua puluh sembilan kasus keadaan tunak dari satu keluarga model iklim; jalur pelapukan yang ditetapkan alih-alih dikopel dinamis; geografi masa kini; lautan slab; metana tetap; obliquity dan eksentrisitas nol; tanpa tanah, vegetasi, atau umpan balik biosfer eksplisit; ambang panas dan karbon dioksida yang tidak pasti; dan perbedaan besar antar-model dekat kondisi moist dan runaway greenhouse.

Seberapa besar keyakinan yang layak dimiliki pembaca umum? Tinggi bahwa studi memperluas rentang model yang masuk akal dan mengidentifikasi asumsi yang mengendalikannya. Sedang terhadap rentang numerik sebagai bracket yang berguna di dalam model ini. Rendah terhadap tanggal tepat apa pun, karena batas akhir terjauh bergantung pada jalur iklim yang sengaja ekstrem dan biologi yang tidak pasti.

Sumber

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870